doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2024.01.10

基于激光映射方法的天线面板变形重构技术研究

杨德金[1,2]，张子晗[3]，叶 骞[2,4]

(1. 重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400074； 2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 3. 上海交通大学 机械与动力工程学院，上海 200240； 4. 中国科学院 射电天文重点实验室，南京 210008)

摘要： 对大型射电望远镜主反射面的单块面板变形进行了研究，将机器人学六自由度姿态变化应用至大型射电望远镜反射面面板的变形研究当中，提出了一种基于刚体六自由度变形的面板变形表征方式。基于该刚体六自由度姿态变形理论，提出了一种基于光学方法的天线面板变形重构技术，该项技术通过固结于面板上的激光单元所呈现的光斑图像来快速高精度地重构出面板的变形。深入地探究了激光光斑与天线面板变形两者之间的映射关系，将天线面板空间变形问题转化为有限区域内的激光光斑位移问题；对该方案的光斑图像进行了研究，提供了有效的光斑图像处理算法；将图像差分方法与 Canny 边缘检测算法相结合，能够有效地解决传统 Canny 算法在处理小目标时的问题，还采用了高精度亚像素质心定位算法，能够对光斑点进行亚像素级别的定位。为天线面板的测量提供了一种新的、可靠的图像处理方法，也为提高天线面板测量的精度和效率提供了新思路和方法。

关　键　词： 大型射电望远镜；变形重构；图像处理；亚像素

中图分类号： P111.44　　　　**文献标识码：** A

1　引　言

随着各项深空探测活动如宇宙暗物质探索、宇宙演化研究、射电天体探索等的开展，天线作为接收和传输信号的重要工具，也不断朝着口径更大和频率更高的方向发展。天线的口径越大，在观测深空物体时能够获得的信噪比越高，及得到的观测结果越准确。但是，天线口径越大其表面精度就越难以维持，这意味着对天线表面精度的要求也随着口径的增大而变得更加苛刻。同时，随着频率的提高，对于天线的反射面面型精度也有更高的要求。在高

收稿日期： 2023-05-10；　**修回日期：** 2023-10-18

资助项目： 国家重点研发计划 (2021YFC2203501)

通讯作者： 叶骞，yeqian@shao.ac.cn

频率下，即使微小的表面形变也会对反射产生明显的影响，导致信号的损失或扭曲。因此，需要使用更高精度的测量系统，对天线的面型进行及时校正和补偿，以确保天线表面的形态精度。

Ruze 公式给出了天线增益 G 与其主反射面表面形变 ε 的关系[1]：

$$\frac{G}{G_0} = \exp\left[-\left(\frac{4\pi\varepsilon}{\lambda}\right)^2\right] \quad , \tag{1}$$

其中，G_0 是理想的、无误差的反射面增益；G 表示天线增益；λ 表示波长，单位为米 (m)；ε 表示天线表面精度，通常以米 (m) 或毫米 (mm) 为单位。此式也再次说明了要想保证天线工作效率必须长期保持较高的天线表面精度。

现有的天线测量系统在一定程度上受到测量速度、测量精度以及设备的限制，特别是在大型天线或高频段上需要更高精度的测量方法和设备。然而，有些测量系统需要进行网格划分或点扫描等较耗时的操作，因此测量速度较慢。如相位全息法[2]需要进行远场的幅值和相位测量，对于大型天线来说需要测量大量的数据点，导致测量时间较长；并且全息法受信号源限制，很难实现全方位、任意俯仰角下的测量。又如激光测距法[3]还对环境条件有一定要求，只有在较好的天气条件才能获得准确数据，测量精度很难达到 0.2 mm 以内。此外，有些测量系统还需要一些昂贵的测量设备，如激光雷达扫描仪和激光跟踪仪[4]等，成本非常高，这就限制了测量设备的使用范围和普及度。摄影测量法[3]的测量过程相对简单，但其测量精度受天线口径的影响很大，口径越大测量精度越差，因此仅用在面形误差要求较低或口径较小的天线上。综上所述，现有测量方法在大型射电望远镜实时测量方面仍然存在测量时间较长、测量过程繁琐、易受环境影响、成本高等不足之处。

射电望远镜主反射面的面型变化是一个复杂的问题，由于反射面是由多个面板组成，因此对面板进行研究是必要的。本文基于大型双反射面射电望远镜——天马望远镜[5]的主反射面面板展开了变形研究，提出了一种可以实时测量面板变形的光学映射测量方法。该方法无需任何昂贵的设备以及耗时的操作，只需利用相机记录光斑位置，然后由论文算法即可快速完成单块面板的测量。这意味着无论在系统复杂度上还是在测量成本和测量时间上都将被大大缩小，此外该测量方法不受天线姿态和仰角以及馈源的限制。本文提出的光学映射方法将天线面板空间变形问题转化为有限区域内激光光斑移动问题，这一创新解决了大口径射电望远镜面板变形测量中的诸多难题，并为不断探索和创新面形测量新技术提供了有益的参考。

2 基于光学映射方法的面板变形重构技术

本文的面板变形重构技术基于光学映射方法，包括三个核心部分：刚体六自由度理论、面板变形与光斑映射关系的数学模型以及图像处理技术。该方法通过空间六自由度描述和记录刚体面板的位置和姿态变化，即刚体变形，然后建立面板与光斑之间的映射关系，利用光斑位置的动态变化来实时映射面板在空间中的 6 个自由度变化。相机作为视觉系统拍摄

光斑位置，并通过本文的图像处理技术提取光斑信息。最终利用光斑位置信息计算刚体面板的空间六自由度变量。

本文主要采用光学映射方法的天线面板变形测量技术，原理如图 1 所示。首先在天线面板 4 个角点上分别设置激光器，并利用激光接收面板接收激光器发出的射线[6]，形成二维的光斑图像，并通过一台高像素工业相机作为拍摄系统[7]记录光斑的位移。当天线面板未发生变形时，每个射线与接收面板的交点是均匀分布的；当天线面板发生变形时，每个射线与接收面板交点的光斑位置也会发生改变。通过推导出两者之间的映射模型，便可以依据接收面板上点的变化重构面板变形。基于上述思路，结合射电望远镜的整体结构，本文以天马望远镜主反射面的单块面板作为研究对象，开展了光学映射方法的天线面板变形重构技术研究。

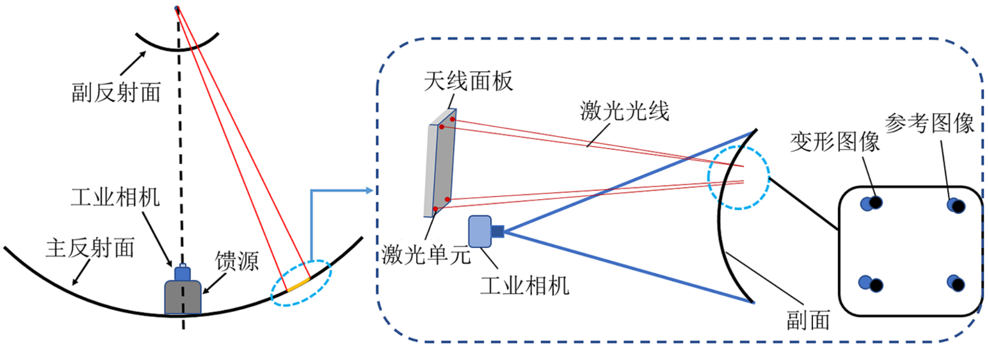

图 1　光学映射方法天线面板变形测量原理图

3　面板变形与光斑映射关系的数学模型

3.1　六自由度参数表征及坐标系建立

机器人学中的“自由度”(degree of freedom, DOF) 指的是机器人在运动过程中独立的运动自由度。一个机器人的 DOF 数量决定了其在空间中能够执行的运动种类和数量。六自由度运动是指机器人可以在三维空间中沿着 x、y、z 这 3 个方向平移，同时可以绕这 3 个方向上的轴进行旋转，因此一共有 6 个独立的自由度。通过这 6 个自由度的组合，机器人可以实现在三维空间中的各种运动，例如在三维空间中抓取物体、对物体进行加工等。同理，假设天线面板为刚体，便可以使用机器人学中的六自由度变换矩阵来描述刚体在三维空间中的位置和姿态，就可以表征天线面板的变形。

对天线面板不同姿态进行表征时，6 个自由度参数分别是沿着 x、y、z 这 3 个轴向的位移量 Δx、Δy、Δz，以及绕 x、y、z 这 3 个轴向的偏转量 α、β、γ。利用六自由度参数表征主面的面板变形，并且利用这一手段我们可以反向重构天线面板的变形，并准确地测量出其在不同姿态下的形变情况。

为了更好地描述天线面板的变形，我们针对单块面板建立了坐标系，便于对其进行分

析和建模。具体如图 2 所示，以面板的中心点为坐标原点 o，过中点且垂直于面板的轴线为坐标轴 z，以面板平面为 x-o-y 面建立单块面板的单元坐标系。

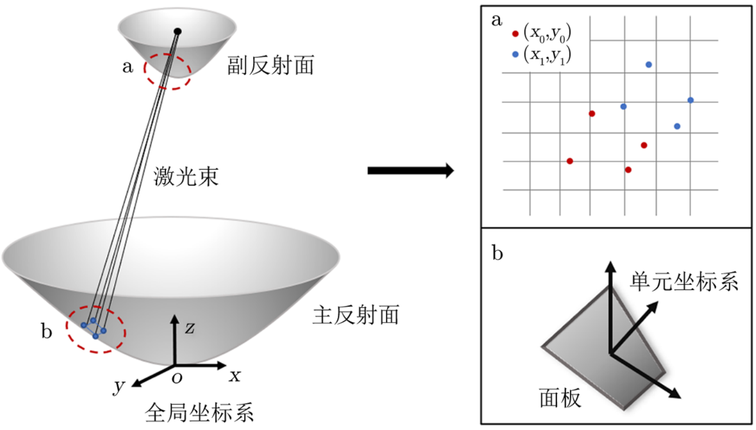

图 2　方案设计与面板单元坐标系

3.2　主面变形-副面光斑方程的建立

对于单面板来说，仅需构建该面板的位移与该面板上激光发射单元投影在副面上的激光光斑位置变化之间的映射关系即可。对于刚体面板，考虑其空间六自由度位移 $(\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma)$，根据刚体平移旋转变换矩阵，可以将其变形前后的坐标变换关系表示为：

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \\ 1 \end{pmatrix} = \boldsymbol{T}(\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma) \times \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad , \tag{2}$$

其中，$(x_0,\ y_0,\ z_0)$ 表示面板变形前刚体上固结点在单元坐标系下的坐标，$(x_d,\ y_d,\ z_d)$ 表示面板变形后刚体上固结点在单元坐标系下的坐标。

$$\boldsymbol{T}(\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma) = \boldsymbol{T_4} \times \boldsymbol{T_3} \times \boldsymbol{T_2} \times \boldsymbol{T_1} \quad , \tag{3}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{T_1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \boldsymbol{T_2} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \boldsymbol{T_3} = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \boldsymbol{T_4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta x \\ 0 & 1 & 0 & \Delta y \\ 0 & 0 & 1 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{cases} , \tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{T}(\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma)$ 表示刚体平移旋转变换矩阵，$\boldsymbol{T_1}$、$\boldsymbol{T_2}$、$\boldsymbol{T_3}$ 表示三个轴向的旋转矩阵，$\boldsymbol{T_4}$ 表示平移矩阵。

3.3　非线性方程组最优化求解问题

将面板 4 个角点发出的激光束视为一个刚性杆 (见图 2)，因其与刚性面板固结，所以面板和激光束可视为一个整体，即跟随面板发生六自由度位移。所以无论是面板上还是激光束上，变形前后的点均可以用式 (2) 来表示。空间中线段与曲面相交，则曲面上的交点 $(x,\ y,\ z)$ 应满足：

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} \quad , \tag{5}$$

其中，$(x_1,\ y_1,\ z_1)$、$(x_2,\ y_2,\ z_2)$ 分别表示线段上的两点，在本文中为线段起点 (面板的角点) 以及线段终点。

天线副反射面在全局坐标系下的曲面方程为：

$$z = a_s\sqrt{\frac{1}{b_s^2}(x^2 + y^2) + 1} + l - a_s \quad , \tag{6}$$

其中，a_s 表示副反射面的实半轴，b_s 表示副反射面的虚半轴，l 表示主反射面顶点与副反射面顶点之间的距离，x、y、z 表示副反射面上的点在全局坐标系中的空间坐标。

式 (5) 可视为一个方程组，对于单个面板，可列出 4 个方程组：

$$\begin{cases} \dfrac{x_m - x_f}{x_i - x_f} = \dfrac{y_m - y_f}{y_i - y_f} \\ \dfrac{x_m - x_f}{x_i - x_f} = \dfrac{z_m - z_f}{z_i - z_f} \end{cases} \quad (i = 1,\ 2,\ 3,\ 4) \quad , \tag{7}$$

其中，$(x_m,\ y_m,\ z_m)$ 表示变形后光斑点 M 的中心坐标，$(x_f,\ y_f,\ z_f)$ 表示激光束上的一点 F 的坐标 (本文取 F 为光束与副面的交点，与 M 点不同的是变形后的 F 坐标是含有待求变量的参数形式)，$(x_i,\ y_i,\ z_i)$ 表示面板上 4 个角点的坐标。

面板发生变形前所有坐标是已知的；发生变形后，根据亚像素算法获取光斑质心坐标 $M(x_m,\ y_m,\ z_m)$，其他坐标为待求坐标。根据式 (2)，可将 $(x_f,\ y_f,\ z_f)$ 以及 $(x_i,\ y_i,\ z_i)$ 表示为已知的变形前坐标与平移旋转变换矩阵相乘，可将待求参数转变为六自由度平移旋转参数 $(\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z,\ \alpha,\ \beta,\ \gamma)$。

计算得到这 6 个参数，便很容易对面板的变形进行数学表征。对于单块面板，每一个角点都可以列出一个形如式 (7) 的方程组，包含两个方程。那么对于 6 个变量，只需其中任意 3 个角点便可实现静定问题 (6 个方程、6 个未知数) 的求解。但考虑实际情况下 3 个角点得到的静定解并不一定满足所有方程，即一组六自由度平移旋转参数无法使方程组每个等式均被满足，可认为存在误差的情况下，方程组为不存在解的矛盾方程组。因此将问题转化为最优化问题，即需要找到一组六自由度平移旋转参数，使得式 (7) 中所有方程等式两边相差最小。本文采用梯度下降算法 (Levenberg-Marquardt) 对上述非线性最优化问题进行求解，得到式 (7) 的最优解。

4 图像处理算法

由上述可知，天线面板的变形是通过光斑位置变化来重构的，因此需要精确的光斑位移才能重构精确的面板变形。在天马望远镜研究过程中我们发现，光斑的最小位移量在微米级，而微米级的位移使得视觉系统无法轻易识别，因此需要借助亚像素定位方法完成。但事实上视觉系统拍摄的图像是存在噪声以及复杂背景的，因此本文引入了图像差分法和 Canny 边缘检测等图像预处理方法。这种方法在处理较小的光斑时十分有效，因为光斑的像素尺寸较小，对于微小的噪音更为敏感；而边缘检测可以更精确地提取光斑的轮廓信息，从而减少噪音对质心定位的影响，实现光斑质心坐标的实时精准提取[8]。

4.1 图像差分法

图像差分法 (image difference method)[9]是一种基于图像灰度差异的目标检测方法，可以用于检测两幅图像之间的变化。其基本原理是将两幅图像进行相减，得到像素级别的差异值，从而检测目标是否发生了变化。通常情况下，两幅图像之间的差异是由目标物体的移动或者出现或者消失等引起的。因此，图像差分法常被用于消除目标图像的背景。在背景相对稳定的情况下，差分法可以很好地完成这个任务。针对本方案，实现上述目的，需要先拍摄

无目标物体的纯背景图作为参考图像，然后将含目标物体的图像与参考图像进行差分，得到目标物体的位置信息图像，从而实现背景消除的效果。

差分方法应用于本方案中，可以很好地消除图片上不相关的复杂背景以及强光源的干扰。对于本方案的具体实现过程如图 3 所示：在激光器未开启之前先拍摄无激光光斑的原始背景图像 b)，然后打开激光器拍摄光斑图像 a)，最终用 a) 减去 b) 便可得到去除背景图像的激光光斑图像 c)。可见差分法对背景以及强光源的消除效果是非常理想的。

a)　　b)　　c)

图 3　图像差分法

4.2　光斑图像边缘处理算法

上述图像差分法可以较好地滤除复杂的背景以及一些强光源的干扰，但是不可避免地一些弱光依然存在。这一情况主要是由参考图像与目标图像拍摄的时间差导致，即无法拍摄出与目标图像完全相同的背景参考图。这些微小噪声一般比目标光斑的灰度值低 (亮度更低)，有的甚至肉眼无法识别，但是依旧会对后续亚像素级别的质心定位造成影响。边缘检测技术可以精准有效识别光斑的边缘轮廓，并达到滤除弱光、增强光斑的效果。Canny 边缘检测[10]是目前应用最为广泛的一类边缘算法。传统的 Canny 边缘检测流程如图 4 所示，主要分为 5 部分：高斯滤波、像素梯度与方向计算、非极大值抑制、双阈值检测和连接边缘。

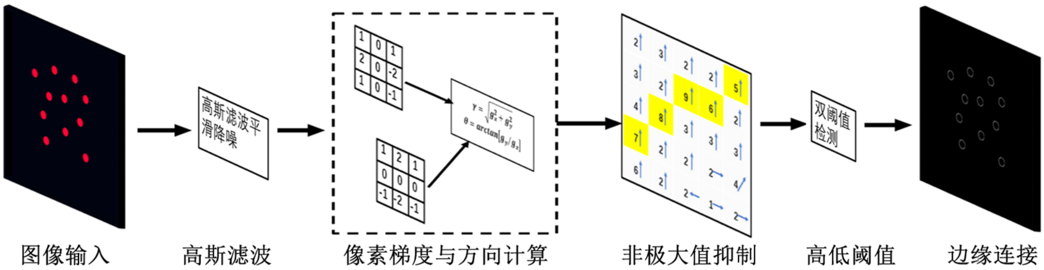

图 4　Canny 边缘检测流程示意图

传统的 Canny 算法在处理较大目标主体时有很好的识别效果，但是对于本方案中的激

光光斑点这样的小目标，传统的 Canny 算法容易受到背景影响而难以准确识别。针对这个问题，本文提出一种新的光斑图像处理思路，将图像差分方法与 Canny 边缘检测算法相结合。在图像预处理阶段，采用图像差分方法对原始图像进行处理，去除背景干扰，使得光斑点更加突出，然后再使用 Canny 算法进行边缘检测。通过这种融合的算法，可以在保证光斑点准确识别的同时，有效去除背景干扰，提高光斑质心的准确性和稳定性。对比图 5 中的实验结果可以看出，传统的 Canny 算法虽然在大目标上有较理想的处理结果，但是无法直接应用于本方案，本文提出的融合算法更加适用于本方案的激光光斑图像的边缘检测。

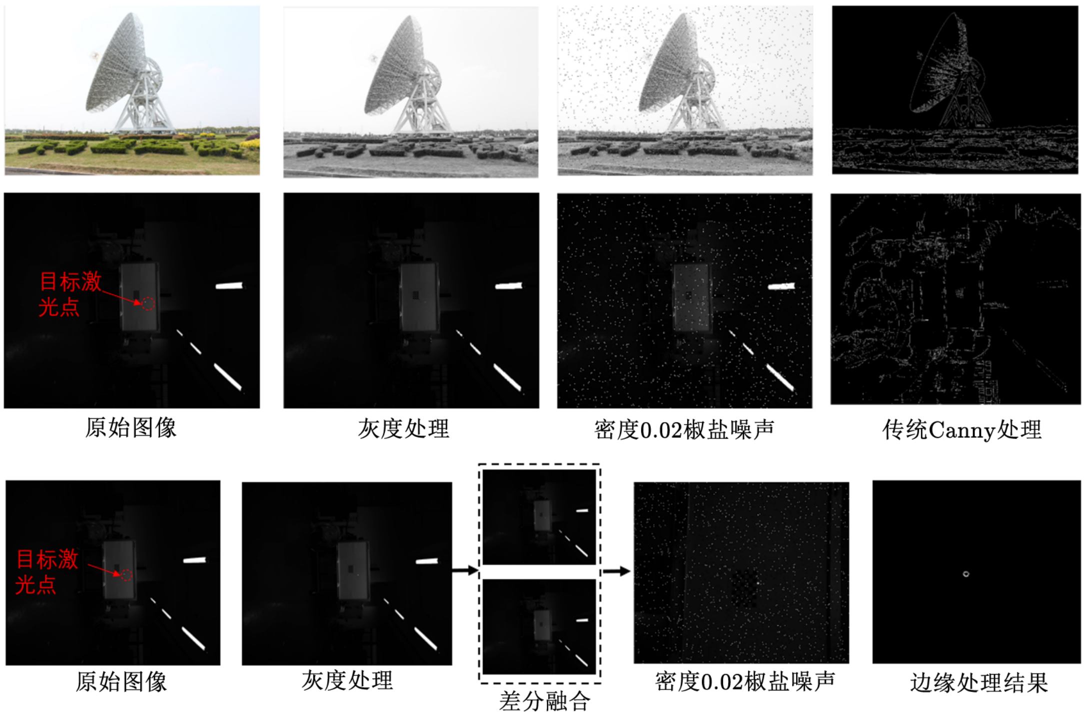

图 5　基于小目标检测的 Canny 边缘算法

4.3　亚像素光斑质心定位

图像经上述处理之后便已完成图像的预处理工作，接下来只需将处理后的仅含有光斑位置信息的图像进行质心定位算法便可完成对光斑的质心提取。同样，亚像素质心算法[11,12]也是一种基于图像灰度值的计算方法，但是区别于差分法和边缘检测等整像素级别的算法，亚像素质心算法则是基于亚像素级别，有更高的计算精度。

灰度中心法是最简单的一种亚像素质心算法，计算过程为：

$$x_{\rm c}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}x_{ij}}{M\times N}\ ,\quad y_{\rm c}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}y_{ij}}{M\times N}\ ,\tag{8}$$

其中，$x_{\rm c}$ 和 $y_{\rm c}$ 分别表示亚像素质心坐标；M 为图像像素高度，N 为图像像素宽度；x_{ij} 和 y_{ij} 为光斑中点的像素坐标。利用该公式遍历图像的每一个像素点，计算其位置坐标以及像

素值得到两个变量 x_{ij} 和 y_{ij}，并将其坐标与像素值累加。遍历完整个图像后，用累加后的结果分别除以图像所有像素，得到的结果即为光斑质心的横坐标和纵坐标。

重心法也可以视为灰度质心法的一种，重心法对于图像的要求一般比较低，适用于多种类型的图像处理任务。在重心法中，像素的灰度值作为权重，用于计算光斑的质心坐标：

$$x_{\rm c}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}x_{ij}\times G(x,y)^{\alpha}}{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}G(x,y)^{\alpha}}\ ,\quad y_{\rm c}=\frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}y_{ij}\times G(x,y)^{\alpha}}{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}G(x,y)^{\alpha}}\quad , \tag{9}$$

其中，$x_{\rm c}$ 和 $y_{\rm c}$ 表示亚像素质心坐标；$G(x,\ y)$ 为像素点的灰度值；α 为权重系数，权重系数越大，则亮度高的像素点权重越大；x_{ij} 和 y_{ij} 为光斑中点的像素坐标；M 为图像像素高度，N 为图像像素宽度。在计算质心坐标时，灰度值更高的像素点会被赋予更大的权重，因此亮度更高的像素点对于质心坐标的计算会有更大的贡献。

海森法是一种寻找函数极值的优化算法，可以利用海森矩阵确定光斑灰度函数极值，从而得到光斑中心的亚像素位置。在这种方法中，海森矩阵用来计算目标函数的二阶偏导数，以确定目标函数在该点的极值位置。根据海森法的原理，目标函数极值点的方向是海森矩阵的特征向量，而极值点的值则是海森矩阵特征值的相反数。因此，在确定光斑中心的亚像素位置时，通常使用海森矩阵的特征向量方向来指导质心计算的方向，进而得到激光光斑中心的亚像素位置。若定义图像灰度函数为 $f(x_1,\ x_2,\ x_3,\ \cdots,\ x_n)$，则可以定义函数 f 的海森矩阵为：

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{f})=\begin{pmatrix}\dfrac{\partial^2 f}{\partial^2 x_1} & \cdots & \dfrac{\partial^2 f}{\partial x_1 x_n}\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ \dfrac{\partial^2 f}{\partial x_n x_1} & \cdots & \dfrac{\partial^2 f}{\partial^2 x_n}\end{pmatrix}\quad . \tag{10}$$

高斯拟合法求质心坐标是一种基于高斯拟合的亚像素定位算法。该方法的基本思想是将光斑看作是二维高斯分布，将像素值看作高斯分布函数的采样值，利用最小二乘法拟合高斯分布函数，得到拟合参数，包括高斯分布的中心、标准差和幅值等。根据拟合参数计算光斑的质心坐标，其中光斑的中心即为高斯分布的中心，具体实现过程为：

$$x_{\rm c}=\frac{\sum_{i=1}^{n}l_i x_i {\rm e}^{-(x_i-x_0)^2/2\sigma^2}}{\sum_{i=1}^{n}l_i {\rm e}^{-(x_i-x_0)^2/2\sigma^2}}\ ,\quad y_{\rm c}=\frac{\sum_{i=1}^{n}l_i y_i {\rm e}^{-(y_i-y_0)^2/2\sigma^2}}{\sum_{i=1}^{n}l_i {\rm e}^{-(y_i-y_0)^2/2\sigma^2}}\quad , \tag{11}$$

其中，$x_{\rm c}$ 和 $y_{\rm c}$ 是光斑的质心坐标，x_i 和 y_i 是第 i 个像素的坐标，l_i 是第 i 个像素的灰度值，x_0 和 y_0 是光斑中心的估计坐标，σ 表示二维高斯分布函数的标准差，n 表示采样点的数量，也即图像中用于计算光斑质心坐标的像素数量。

4.4　光斑质心坐标求解

通过上述图像处理以及质心定位算法，便可以得到目标光斑在图像上的二维质心位置坐标 $C(x_{\rm c},\ y_{\rm c})$。

$$\frac{C(x_{\rm c},\ y_{\rm c})}{S(x,\ y)}=\frac{f}{D}\quad , \tag{12}$$

其中，$C(x_c, y_c)$ 表示光斑中心在相机像素平面中的坐标；$S(x, y)$ 表示副反射面上的激光光斑的二维 (x, y) 坐标；f 表示相机镜头的焦距；D 表示工作距离。

根据式 (12) 计算变形后光斑中心位置在物理世界中的二维位置坐标 $S(x_c, y_c)$。再通过副反射面方程计算变形后激光光斑的 z_c 坐标，便可得到光斑变形后的三维坐标 $S(x_c, y_c, z_c)$，将其代入式 (3) 便可完成上述六自由的计算过程。

5 图像处理算法实验测试

为进一步保障文中图像处理算法在本方案中的定位精度，本文对图像处理方法的定位精度进行了相应实验测试。基于上述目的以及第 4 章的图像整体处理流程，确定本实验所需的必要仪器，分别有激光发射器、工业相机、镜头、移动平台以及激光测距仪等。本文实验设备的具体参数如表 1 所示。

表 1 实验设备参数

设备	参数
工业相机	分辨率：2 560×2 160 (500 万像素)
HK-A5100-GM17	像元尺寸：6.5×6.5 μm；传感器尺寸 4/3″
工业镜头	焦距：12 mm，镜头尺寸：1.2″
MVL-KF1224M-25MP	分辨率：2 500 万，C 接口镜头
激光测距仪	测距精度：1 mm；角度精度：0.1°
移动平台	移动精度：10 μm；自由度：单自由度

实验前，首先将相机与镜头进行组装调试并预热；然后将激光发射器与移动平台进行组装固定，需保障移动平台与激光器无相对运动，进而通过移动平台来控制光斑移动。激光测距仪需固定在与相机平行的位置，用以确定每组数据的物距，也即相机与激光接收平面的距离，具体如图 6 所示。实验时，先关闭激光器，利用相机先拍摄无光斑时的背景图；然后打开激光器进行光斑初始位置的拍摄；最后通过移动平台将光斑移动一段已知的距离再进行拍摄。至此，一组完整的数据便已采集完成。按第 4 章所述对采集的数据进行处理和计算，便可获取光斑移动前后的质心坐标，进而得到亚像素级别的光斑移动距离。

因为光斑的位移是通过移动平台实现的，故光斑的实际移动距离是已知的。实验计算的距离与真实的移动距离进行做差便可得到这一组实验中亚像素方法的定位精度。通过改变物距以及移动平台的移动量来循环上述实验操作便可获得大量的结果，并把实验数据分为两大组 (随机分) 分别求均值和标准差，结果如表 2 所示。

实验结果表明，文中图像处理算法在处理光斑图像时具有非常明显的优势，其定位误差可以控制在较理想的亚像素级别，并且两组数据之间也未出现较大波动，也间接验证了实验的准确性和本方案的稳定性。通过分析表中结果，我们可以发现多个数据的定位误差已经降至 0.03 pixel (甚至 0.02 pixel) 的水平，这表明本文的图像处理算法在实际应用中能够非常

图 6 实验平台搭建

表 2 边缘检测和质心定位

类型	组 1 均值/pixel		组 1 标准差/pixel		组 2 均值/pixel		组 2 标准差/pixel	
	x	y	x	y	x	y	x	y
高斯法	0.1026	0.0347	0.0134	0.0191	0.1152	0.0606	0.0111	0.0208
一阶重心法	0.0064	0.0242	0.0050	0.0121	0.0664	0.0092	0.0055	0.0081
二阶重心法	0.0231	0.0330	0.0080	0.0121	0.0687	0.0100	0.0045	0.0059
三阶重心法	0.0371	0.0389	0.0084	0.0127	0.0843	0.0159	0.0058	0.0079
中心法	0.0200	0.0586	0.0062	0.0148	0.1157	0.0387	0.0148	0.0255
海森法	0.0096	0.0142	0.0093	0.0089	0.0477	0.0194	0.0153	0.0166

准确地进行测量和定位。另外，通过对比可以发现，一阶重心法更适用于本方案的小目标质心定位。通过上述数据可以看到，在文中边缘预处理的加持下，一阶重心算法的精度可以较好维持在 0.0125 pixel 左右。

6 单块面板的变形模拟与测量实验

为了验证本文提出的面板变形测量技术的有效性和映射关系的正确性，本文通过有限元方法模拟了天马望远镜主面的单块面板在重力作用下的真实变形[13]。然后，使用本文所提出的测量方法, 基于 Matlab 对该块面板变形进行了重构。最后，通过将有限元模拟的真实变形结果与本文测量结果进行对比，从而评估该光学映射测量方法的误差水平。需要说明的是，为了控制单一误差变量和科学验证六自由度映射测量法，因此光斑位移量并未引入定位误差。

天马望远镜的主反射面共由 1008 块实体面板拼接而成，共分 14 环。本研究选取第 9 环中随机一块面板为实例对象，并提取了该面板在俯仰角分别为 45° 和 15° 时的有限元，然后模拟重力变形后的坐标，作为真实的面板变形情况。随后，采用本文所提出的测量方法进行实验，并与真实变形进行对比。首先，面板变形前 4 角点的坐标是已知的。通过面板角点

坐标与天线焦点坐标可以得到各激光光束的直线方程，并联立天线副面方程求解激光与副面的交点坐标，也即光斑坐标。用同样方法，可以求得变形后光斑的位置坐标，从而获得准确的光斑移动量。接下来，利用光斑的移动量重构面板的变形，即第 3 章求解刚体面板的空间六自由度。已知面板各角点的六自由度变形量后，基于变形前各角点的原始坐标，可以得到面板变形后的各角点坐标，这些坐标即为本文方法的测量结果。最后，将测量结果与有限元模拟变形后的坐标进行比较，得出本文方法的测量误差。详细结果数据见表 3 和表 4。

表 3　俯仰角 45° 时重力变形的测试结果

参量		角点编号 519	520	615	616
变形后真实坐标/m	X	−16.580 845 88	−17.377 494 85	−18.235 939 96	−19.112 100 09
	Y	12.721 528 6	11.609 857 44	13.991 418 31	12.768 777 41
	Z	5.251 740 581	5.251 690 669	6.352 309 82	6.352 270 594
光斑位移量/mm	X	0.39	0.391	0.503	0.505
	Y	1.71	1.787	1.629	1.718
	Z	0.304	0.277	0.269	0.243
本文测量结果/m	X	−16.580 867 3	−17.377 482 24	−18.235 949 44	−19.112 081 8
	Y	12.721 526 35	11.609 835 61	13.991 439 28	12.768 780 52
	Y	5.251 743 866	5.251 683 756	6.352 325 076	6.352 258 966
误差/m	X	2.14×10^{-05}	-1.26×10^{-05}	9.48×10^{-06}	-1.83×10^{-05}
	Y	2.25×10^{-06}	2.18×10^{-05}	-2.10×10^{-05}	-3.11×10^{-06}
	Z	-3.29×10^{-06}	6.91×10^{-06}	-1.53×10^{-05}	1.16×10^{-05}
耗时/s		1.364 657 981			

表 4　俯仰角 15° 时重力变形的测试结果

参量		角点编号 519	520	615	616
变形后真实坐标/m	X	−16.580 409 33	−17.377 216 67	−18.235 462 82	−19.111 718 86
	Y	12.715 087 09	11.603 515 09	13.984 464 46	12.761 906 58
	Z	5.262 280 514	5.261 890 323	6.363 400 155	6.363 126 344
光斑位移量/mm	X	4.388	4.468	5.191	5.27
	Y	9.202	9.787	8.62	9.286
	Z	0.87	0.703	0.502	0.341
本文测量结果/m	X	−16.580 420 993	−17.377 142 76	−18.235 502 28	−19.111 636 69
	Y	12.715 081 25	11.603 502 772	13.984 475 877	12.761 921 42
	Y	5.262 278 444	5.261 870 998	6.363 498 005	6.363 049 888
误差/m	X	1.17×10^{-05}	-7.39×10^{-05}	3.95×10^{-05}	8.22×10^{-05}
	Y	5.84×10^{-06}	1.23×10^{-05}	-1.14×10^{-05}	-1.48×10^{-05}
	Z	2.07×10^{-06}	1.93×10^{-05}	-9.79×10^{-05}	7.65×10^{-05}
耗时/s		1.548 967 489			

表 3 和表 4 中提供了有限元模拟重力变形后的真实角点坐标和本文方法得到的光斑移动量以及变形测量结果、测量误差、耗时数据。从误差结果可知，利用本文映射方法对天线刚体面板姿态变化的测量结果达到了预期的效果。与有限元仿真结果相比，测量误差仅在几微米到几十微米的范围内。这一结果进一步证实了本文所提出的光学映射测量法能够准确地测量大型射电望远镜天线面板在六个自由度上的变形，包括平移、旋转等多种变形形式。此外，利用本文方法，安装好测量系统后，单块面板的变形仅在 2 s 内便可快速完成重构，这对于天线局部测量与评估具有重要意义，并为实时监督和调整天线面板的姿态提供了可靠的手段。

7 结 语

本文提出了一种全新的基于光学方法的天线面板变形重构技术。该技术采用刚体六自由度姿态变形理论对面板刚性变形进行表征，将激光光斑与天线面板变形进行关联，并成功推导出了两者之间的映射关系。将这一映射关系与六自由度变形理论相结合，实现了对天线刚体面板的变形重构。本文还提出了有效的光斑图像处理算法。针对传统 Canny 算法在处理光斑点这样的小目标时容易受到背景干扰而导致识别准确性下降的问题，本文对算法进行了改进。本文将图像差分方法与 Canny 边缘检测算法相结合，可以在保证光斑点准确识别的同时，有效去除背景干扰，提高光斑质心的准确性和稳定性。另外，为了进一步提高光斑质心的定位精度，本文还采用了高精度亚像素质心定位算法，能够对光斑点进行亚像素级别的定位，进一步提高了整个光斑图像处理算法的准确性和效率。

未来还可以进一步优化本文方法，例如解耦天线所有面板之间的关系，将本文方法应用至天线所有面板上，对天线面型进行实时的测量。另外也可以进一步优化算法的处理精度和速度，并研究各种误差的补偿方法等，扩大应用范围，使其适用于更多天线类型和应用场景，为天线领域的发展做出更多的贡献。

致谢

感谢中国科学院上海天文台付丽研究员提供的天马有限元模型数据，感谢上海交通大学 SMC 技术中心提供的实验室和设备，感谢李旺和涂标同学在本文面板的研究中给予的帮助。

参考文献：

[1] 闵捷. 硕士论文, 成都: 电子科技大学, 2021: 87
[2] 王志桥, 陈卯蒸, 裴鑫, 等. 天文学报, 2017, 58(05): 56
[3] 汪赞, 孔德庆, 陈志平. 天文研究与技术, 2020, 17(01): 52
[4] 许谦, 连培园. 武汉大学学报, 2022, 47(03): 396
[5] 董健, 刘庆会. 中国科学: 物理学力学天文学, 2021, 51(02): 152

[6] 曹东杰. 硕士论文, 西安: 西安电子科技大学, 2021: 91
[7] 李震, 颜少华, 刘岳, 等. 现代电子技术, 2021, 44(07): 50
[8] 洪莺. 硕士论文, 南京: 南京邮电大学, 2022: 72
[9] 朱寒, 林丽, 王健华, 等. 应用光学, 2020, 41(04): 837
[10] 于晓海, 张阳, 须颖. 机械与电子, 2020, 38(01): 6
[11] 李开平, 蔡萍. 仪器仪表学报, 2020, 41(08): 180
[12] 陈运锦, 冯莹, 魏立安, 等. 光电工程, 2010, 37(02): 80
[13] 付丽, 董健, 凌权宝, 等. 电波科学学报, 2017, 32(03): 314

Research on Deformation Reconstruction Technology of Antenna Panel Based on Laser Mapping Method

YANG De-jin[1,2], ZHANG Zi-han[3], YE Qian[2,4]

(1. Chongqing Jiaotong University, School of Civil Engineering, Chongqing 400074, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Shanghai Jiao Tong University, School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai 200240, China; 4. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: In this paper, a single panel deformation of the main reflector of a large radio telescope is studied and the six degrees of freedom attitude change of robotics is applied to the deformation of the reflector panel of a large radio telescope. A characterization method of panel deformation based on six degrees of freedom deformation of rigid body is proposed. Based on the six-DOF attitude deformation theory of rigid body, an optical reconstruction technique of antenna panel deformation is proposed in this paper. This technology can reconstruct the deformation of the panel quickly and accurately by the spot image presented by the laser unit consolidated on the panel. In this paper, the mapping relationship between laser spot and antenna panel deformation is deeply explored, and the spatial deformation problem of antenna panel is transformed into the laser spot displacement problem in a finite region. And the light spot image of this scheme is studied, and an effective light spot image processing algorithm is provided. It integrates the image difference method and Canny edge detection algorithm, which can effectively solve the problem of traditional Canny algorithm in dealing with small targets. It also uses the high-precision sub-pixel centroid localization algorithm, which can locate light spots at sub-pixel level. It provides a new and reliable image processing method for antenna panel measurement. This study also provides a new idea and method for improving the accuracy and efficiency of antenna panel measurement.

Key words: large radio telescopes; deformation reconstruction; image processing; subpixel